بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان

دانشکده‌ی علوم

گروه فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد رشته فوتونیک

شبیه‌سازی انتشار تپ‌های الکترومغناطیسی در تار نوری به روش‌های عددی در حوزه زمان

استاد راهنما

دکتر مهدی سویزی

استاد مشاور

معظمه حسن زاده

نگارنده

مجتبی ابوالحسنی

تیر ماه ۱۳۹۲

دانشگاه ولی‌عصر(عج) رفسنجان

دانشکده‌ی علوم پایه

گروه فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشدرشته‌ی فوتونیک

آقای مجتبی ابوالحسنی با عنوان

شبیه سازی انتشار تپ‌های الکترومغناطیسی در تار نوری به روش‌های عددی در حوزه زمان

در تاریخ ۹۲/۴/۱۲ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکترمهدی سویزی	با مرتبه ی علمی استادیار	امضا
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	معظمه حسن زاده	با مرتبه‌ی علمی مربی	امضاء
۲- استاد داور داخل گروه	دکتر حسن رنجبرعسگری	با مرتبه ی علمی‌دانشیار	امضاء
۳- استاد داور داخل از گروه	دکتر پروانه ایرانمنش	با مرتبه ی علمی استادیار	امضا
۴- نماینده‌ی تحصیلات تکمیلی	دکتر وحید مظفری	با مرتبه ی علمی دانشیار	امضاء

تمامی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های

حاصل از پژوهش موضوع این پایان‌نامه، متعلق به دانشگاه

ولی‌عصر (عج) رفسنجان است.

تقدیم به مقدس ترین واژه های زندگیم

پدر دلسوزم

و

مادر مهربانم

چکیده

تپ‌های کوتاه امروزه حوزه عظیمی از پژوهش‌های اپتیکی و لیزری از ثبت فرآیندهای سریع فیزیکی و شیمیایی تا استفاده برای دست‌یابی به شدت‌های بسیار بالا را به خود اختصاص داده‌اند. از این میان، انتقال اطلاعات توسط آنها با استفاده از تارهای نوری توسعه فراوانی یافته است. از این نظر که بررسی تغییرات تپ در هنگام عبور از تار نوری دارای اهمیت است، در این پژوهش رفتار عرضی و طولی تپ در هنگام عبور از تارهای نوری با رفتار خطی و غیر خطی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب بعد از به دست آوردن معادلات حاکم بر انتشار تپ در تارهای نوری، آنها توسط دو روش عددی FDTD و روش تلفیقی تحلیلی _ عددی حل شدند. استفاده از روش تلفیقی تحلیلی _ عددی این امکان را به وجود آورد، که شبیه‌سازی انتشار تپ‌های الکترومغناطیسی در طول تارهای بلند و با زمان اجرای برنامه کوتاه امکان پذیر شود. پس از شبیه‌سازی انتشار تپ‌ها در تارهای مختلف این نتیجه به دست آمد که در تارهای با ضریب شکست پله‌ای به دلیل اختلاف فاز بین مدهای مشخصه تار امکان انتشار تپ‌های سالیتونی وجود ندارد. البته وجود این اختلاف فاز بین مدهای مشخصه تار سبب ایجاد نوارهای تاریک و روشن در مقطع عرضی تارهای چند مدی می‌شود. این در حالی است که در تارهای تک مدی با محیطی با رفتار غیرخطی به دلیل جبران شدن اثرات پهن شدگی تپ در اثر پاشندگی و همچنین داشتن یک مد مشخصه امکان انتقال سالیتون‌ها در این‌گونه تارها میسر می‌شود.

کلید واژه: تپ الکترومغناطیسی، تار نوری، FDTD، شبیه‌سازی عددی، سالیتون، پاشندگی محیط

فهرست مطالب

عنوان ..... صفحه

فصل اول : مقدمه ۱

فصل دوم: مفاهیم پایه ۳

۲-۱- موج ۳

۲-۱-۱- معادله دیفرانسیل موج ٤

۲-۱-۲- اصل برهم‌نهی امواج ٤

۲-۲- ماهیت نور ۵

۲-۲-۱- تابش الکترومغناطیسی ٥

۲-۲-۲- تپ الکترومغناطیسی ٥

۲-۲-۳- طیف الکترومغناطیسی ٦

۲-۳- سرعت فاز ۷

۲-۳-۱- سرعت گروه ۷

۲-۳-۲- پاشندگی ۷

۲-۴- لیزر ۸

۲-۴-۱- لیزر تپی ۹

۲-۴-۲- روش کلید زنی Q ۹

۲-۴-۳- روش قفل شدگی مد ۱۱

۲-۵- پدیده‌های غیر خطی ۱۳

۲-۵-۱- خود کانونی کردن نور ۱۳

۲-۵-۲- خود گیراندازی نور ۱٤

۲-۵-۳- مدولاسیون خود فاز ۱٥

۲-۶- سالیتون ۱۵

۲-۷- تار نوری ۱۶

۲-۷-۱- انواع تارهای نوری ۱۷
۲-۸- کاربردهای لیزرهای تپی ۱۸
۲-۸-۱- کاربرد در زیست‌شناسی و پزشکی ۱۸
۲-۸-۲- شناسایی مواد ۱۸
۲-۸-۳- ارتباطات نوری ۱۹
۲-۸-۴- گداخت گرما هسته‌ای ۱۹
۲-۸-۵- کاربردهای نظامی ۲۰
فصل سوم: معادلات حاکم بر انتشار تپ الکترومغناطیسی ۲۱
۳-۱- انتشار تپ در محیط نوری غیرخطی و با دهانه نامحدود ۲۱
۳-۲- انتشار تپ در محیط نوری خطی و با دهانه محدود ۲۵
۳-۲-۱- انتشار تپ در محیط نوری غیرخطی و با دهانه محدود ۲۷
۳-۳- روش‌های حل معادلات حاکم بر انتشار تپ الکترومغناطیسی ۲۸
۳-۳-۱- روش عددی FDTD ۲۹
۳-۳-۲- روش تحلیلی _ عددی ۳۲
۳-۴- توصیف انتشار تپ در تار نوری ۳۷
۳-۵- برازش قسمت عرضی دامنه تپ ورودی به تار نوری ۳۸
۳-۵-۱- انتشار تپ با توزیع عرضی گاوسی ۳۹
۳-۵-۲- انتشار تپ با توزیع عرضی لورنتسی ٤٤
فصل چهارم: تحلیل و بررسی ٤٨
۴-۱- مقایسه روش FDTD و روش تحلیلی _ عددی ۴۸
۴-۱-۱- مزیت روش تحلیلی _ عددی ٥٤
۴-۲- انتشار تپ در تار نوری با رفتار خطی ۵۴
۴-۲-۱- انتشار تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی ٥٥
۴-۲-۲- انتشار تپ با توزیع عرضی لورنتسی و توزیع طولی گاوسی ٦٣
۴-۳- انتشار تپ در تار نوری با رفتار غیر خطی ۶۶

۴-۳-۱- انتشار تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی ٦٦
۴-۳-۲- انتشار تپ با توزیع عرضی گاوسی و توزیع طولی سکانت هایپربولیکی ۷۱
فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۷٦
منابع ۸۱

فهرست شکل‌ها

عنوان ..... صفحه

شکل ۲-۱: تپ الکترومغناطیسی ٦

شکل ۲-۲: روش کلید زنی Q ۱۰

شکل ۲-۳: توزیع فضایی انرژی باریکه لیزر بر روی پرده..... ۱۱

شکل ۲-۴: تشدیدگر (کاواک)..... ۱۲

شکل ۲-۵: عدسی همگرا..... ۱۳

شکل ۲-۶: خود کانونی شدن پرتو پر توان لیزر ۱٤

شکل ۲-۷: برشی مقطعی از تار نوری ۱٦

شکل ۲-۸: نمایی از ساختار تارهای تک مد و چند مد ۱۷

شکل ۳-۱: شبکه بندی در روش FDTD..... ۲۹

شکل ۳-۲: شبکه بندی در روش تلفیقی تحلیلی _ عددی..... ۳٤

شکل ۳-۳: مقایسه قسمت عرضی دامنه تپ ورودی با توزیع گاوسی به تار نوری با برهمنهی مدهای مجاز تار نوری با یک یا چند مد مشخصه با شرط $w \langle (a / ۳)$ ٤۲

شکل ۳-۴: مقایسه قسمت عرضی دامنه تپ ورودی با توزیع گاوسی به تار نوری با برهمنهی مدهای مجاز تار نوری با یک یا چند مد مشخصه با شرط $w = ۳۰۰\, nm$ ٤۳

شکل ۳-۵: مقایسه قسمت عرضی دامنه تپ ورودی با توزیع لورنتسی به تار نوری با برهمنهی مدهای مجاز تار نوری با یک یا چند مد مشخصه با شرط $w \langle (a / ۳)$ ٤٦

شکل ۳-۶: مقایسه قسمت عرضی دامنه تپ ورودی با توزیع لورنتسی به تار نوری با برهمنهی مدهای مجاز تار نوری با یک یا چند مد مشخصه با شرط $w = ۳۰۰\ nm$ ٤۷

شکل ۴-۱: دامنه تپ ورودی با توزیع عرضی وطولی گاوسی ٤۹

شکل ۴-۲: دامنه تپ خروجی از تار تک مد به طول ۱cm (روش FDTD)..... ٤۹

شکل ۴-۳: دامنه تپ خروجی از تار تک مد به طول ۱cm (روش تحلیلی _ عددی) ۵۰

شکل ۴-۴:مقایسه دامنه تپ خروجی از تار تک مد به طول ۱cm به کمک دو روش در زمان ۸۰ns ۵۰

شکل ۴-۵: مقایسه دامنه تپ خروجی از تار تک مد با طول‌های مختلف در زمان ۸۰ns به کمک دو روش ۵۱

شکل ۴-۶: مقایسه دامنه تپ خروجی از تار تک مد به طول ۶/۴cm تا ۱۰cm در زمان ۸۰ns به کمک دو روش..... ۵۲

شکل ۴-۷: مقایسه دامنه تپ خروجی از تار چهار مدی به طول ۱cm به کمک دو روش در زمان ۸۰ns ۵۲
شکل ۴-۸: دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی در هنگام ورود به تار تک مدی ۵۵
شکل ۴-۹: دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی در هنگام خروج از تار تک مدی به طول پنج کیلومتر ۵۶
شکل ۴-۱۰: تغییرات قسمت طولی دامنه تپ با توزیع گاوسی در طول تار تک مدی ۵۷
شکل ۴-۱۱: دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی در هنگام ورود وخروج از تار دو مدی به طول پنج کیلومتر ۵۸
شکل ۴-۱۲: دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی در هنگام خروج از تار دو مدی به طول پنج کیلومتر در زمان‌های مختلف ۵۹
شکل ۴-۱۳: دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی در (الف) هنگام ورود و (ب) در هنگام خروج از تار چهار مدی به طول پنج کیلومتر ۶۰
شکل ۴-۱۴: مقایسه دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی در هنگام ورود و خروج از تار چهار مدی به طول پنج کیلومتر ... ۶۱
شکل ۴-۱۵: مقایسه دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی ورودی و خروجی از تار تک چند مدی به طول پنج کیلومتر در شعاع صفر ۶۲
شکل ۴-۱۶: دامنه تپ با توزیع عرضی لورنتسی و توزیع طولی گاوسی در هنگام ورود به تار چهار مدی ۶۳
شکل ۴-۱۷: مقایسه دامنه تپ با توزیع عرضی لورنتسی و توزیع طولی گاوسی در هنگام ورود و خروج از تار چهار مدی به طول پنج کیلومتر ۶۴
شکل ۴-۱۸: مقایسه دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی با دامنه تپ با توزیع عرضی لورنتسی و توزیع طولی گاوسی خروجی از تار به طول پنج کیلومتر در شعاع صفر ۶۵
شکل ۴-۱۹: دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی در هنگام خروج از تار تک مدی با رفتار غیر خطی به طول پنج کیلومتر. ۶۶
شکل ۴-۲۰: مقایسه دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی ورودی و خروجی از تار تک مد با رفتار غیر خطی و با رفتار خطی به طول پنج کیلومتر ۶۷
شکل ۴-۲۱: تغییرات قسمت طولی دامنه تپ با توزیع گاوسی در طول تار تک مدی با رفتار غیر خطی ۶۸
شکل ۴-۲۲: دامنه تپ با توزیع عرضی و طولی گاوسی در هنگام خروج از تار چهار مدی با رفتار غیر خطی به طول پنج کیلومتر ۶۹
شکل ۴-۲۳: مقایسه تغییرات قسمت طولی دامنه تپ با توزیع گاوسی در طول تار چهار مدی با رفتار غیر خطی و با رفتار خطی در طول پنج کیلومتری، ۷۰
شکل ۴-۲۴: دامنه تپ ورودی با توزیع عرضی گاوسی وطولی sech به تار تک مدی ۷۱
شکل ۴-۲۵: دامنه تپ با توزیع عرضی گاوسی و توزیع طولی sech در هنگام خروج از تار تک مدی با رفتار غیر خطی به طول پنج کیلومتر و در زمان ۸۰ نانو ثانیه ۷۲

شکل ۴-۲۶: تغییرات قسمت طولی دامنه تپ با توزیع sech در طول تار تک مدی با رفتار غیر خطی ۷۳
شکل ۴-۲۷: دامنه تپ با توزیع عرضی گاوسی و توزیع طولی sech در هنگام خروج از تار چهار مدی با رفتار غیرخطی به طول پنج کیلومتر ۷٤
شکل ۴-۲۸: مقایسه دامنه تپ با توزیع عرضی گاوسی و توزیع طولی sech، خروجی از تار چهار، و تک مدی با رفتار غیر خطی به طول پنج کیلومتر در شعاع صفر ۷۵

فهرست جداول

.عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: مقادیر f_0^i ها برای تپ با توزیع عرضی گاوسی با شرط $w \langle (a/۳)$ ۴۰

جدول ۱-۲: مقادیر پارامتر e برای تپ با توزیع عرضی گاوسی با شرط $w \langle (a/۳)$ ۴۰

.جدول ۱-۳: مقادیر f_0^i ها برای تپ با توزیع عرضی گاوسی با شرط $w = ۳۰۰\ nm$ ۴۱

جدول ۱-۴: مقادیر پارامتر e برای تپ با توزیع عرضی گاوسی با شرط $w = ۳۰۰\ nm$ ۴۱

جدول ۱-۳: مقادیر f_0^i ها برای تپ با توزیع عرضی لورنتسی با شرط $w \langle (a/۳)$ ۴۴

جدول ۱-۴: مقادیر پارامتر e برای تپ با توزیع عرضی لورنتسی با شرط . $w \langle (a/۳)$ ۴۴

جدول ۱-۷: مقادیر f_0^i ها برای تپ با توزیع عرضی لورنتسی با شرط . $w = ۳۰۰\ nm$ ۴۵

جدول ۱-۸: مقادیر پارامتر e برای تپ با توزیع عرضی لورنتسی با شرط $w = ۳۰۰\ nm$ ۴۵

فصل اول

مقدمه

از ابتدای خلقت، انسان‌ها همیشه به دنبال برقراری ارتباط با یکدیگر بوده‌اند. شاید اولین سعی بشر در این راستا ایجاد صداهای مختلف بوده است که توسط آن منظور خود را به دیگران می‌رسانده است. ایجاد ارتباط بین انسان‌ها و تبادل اطلاعات بین آنها مانند سایر ابعاد زندگی روز به روز پیشرفت کرد. در این میان همیشه سرعت ارسال اطلاعات مورد توجه بوده است. کشف امواج الکترومغناطیسی شاید نقطه عطفی از یک انقلاب در زمینه ارتباطات بود. بعد از کشف این امواج اختراع دستگاه‌های مختلف ارتباطی سرعت چشم گیری یافت. از این میان می‌توان به تلگراف، تلفن، دستگاه‌های بیسم با استفاده از امواج رادیویی اشاره کرد. اما باز هم بشر به کوشش خود ادامه داد تا اینکه لیزر اختراع شد[۱].

نور شگفت انگیز لیزر یک رویای دست نیافتنی را برای بشر به واقعیت تبدیل کرد. به مجرد اینکه لیزر اختراع شد فکرها به این سمت رفت که از آن برای انتقال اطلاعات بهره ببرند. تارهای نوری که قبل از پیدایش لیزر ساخته شده بودند به دلیل ناکار آمد بودن نور چشمه‌های غیر لیزری در ارسال اطلاعات توسط آنها تقریبا نامناسب بودند که با پیدایش لیزر روز به روز استفاده از آنها در بحث انتقال اطلاعات سرعت گرفت.

در کنار فاکتور سرعت برای ارسال اطلاعات که همیشه و از دیرباز مورد توجه بوده است حجم اطلاعات ارسالی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. بدین منظور چند سال پس از ابداع لیزر با پیدایش روش‌هایی توانستند تپ‌های لیزری را تولید کنند. تپ لیزر از یک باند فرکانسی پهن برخوردار است و این موضوع سبب می‌شود بتوان با آن اطلاعات بیشتری را انتقال داد[۲].

بررسی و پژوهش در زمینه انتشار تپ‌های الکترومغناطیسی سابقه بسیار طولانی دارد. در بیشتر کارهای انجام شده بیشتر از تپ به علت شدت بالای آن، یک استفاده ابزاری کرده‌اند. از این میان می‌توان به استفاده از تپ‌های قوی در تولید پلاسما[۳]، مرتبه‌های مختلف اثرات غیر خطی محیط[۴]، طیف سنجی‌های مختلف از مواد [۵]، اندازه گیری اجسام میکروسکپی[۶]، و... اشاره کرد. البته کارهای مختلفی نیز در زمینه بررسی رفتار تپ در هنگام انتشار در محیط‌های مختلف انجام شده است. در بیشتر این کارها محیط مورد بررسی دهانه‌ای نامحدود دارد[۷،۸] و در آنها تاثیر پاشندگی محیط بر نحوه انتشار تپ مورد توجه قرار گرفته است.

در بررسی‌های جدیدتر معمولا تپ‌های فوق کوتاه را به کار می‌برند تا تاثیر آثار غیرخطی محیط را نیز بررسی کنند[۹،۱۰]. به دلیل اینکه دهانه محیط نامحدود فرض می‌شود در تمام این بررسی‌ها رفتار طولی تپ‌ها مورد بررسی قرار گرفته است[۱۳]. در بررسی‌های انجام شده در زمینه انتشار تپ در تارهای نوری (محیط با دهانه محدود) بیشتر تارهای تک مد و رفتار طولی تپ مورد توجه بوده است[۱۱،۱۴،۳۲].

اما در این پژوهش نه تنها رفتار طولی تپ‌ها بلکه رفتار عرضی تپ‌ها در هنگام انتشار در تارهای تک مدی و چند مدی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا با استفاده از معادلات ماکسول سعی شد معادلات حاکم بر انتشار تپ در تارهای نوری پاشنده و با رفتار خطی و غیرخطی به دست آورده شود[۱۲]، سپس با استفاده از یک روش تلفیقی تحلیلی – عددی انتشار تپ‌ها در تارهای نوری تک مدی و چند مدی شبیه سازی شدند[۱۵،۱۶]. بدین ترتیب که ابتدا معادله حاکم بر انتشار تپ به دو بخش عرضی و طولی مورد تفکیک قرار گرفت. برای جواب قسمت عرضی از حل تحلیلی برای انتشار امواج تک رنگ در تار استفاده شد و قسمت طولی به کمک روش عددی حل شد[۱۷،۱۸]. برای به دست آوردن تپ خروجی ابتدا تپ‌ها به مدهای مشخصه تار تجزیه شدند و سپس تک تک آنها درمد مربوط به خودش در تار انتشار داده شدند و در نهایت آنها در هنگام خروج از تار با هم جمع شدند و تپ خروجی از تار را به وجود آوردند.

فصل دوم
مفاهیم پایه و کاربردها

۲-۱-موج

موج اغتشاشی خود پایا در محیط حامل آن می‌باشد، که این ویژگی، وجه اصلی موج متحرک است. آشناترین امواج، و ساده‌ترین امواج قابل تصور امواج مکانیکی هستند که از میان آنها می‌توان امواج روی ریسمان، امواج روی سطح سیال، امواج صوتی در هوا و امواج فشاری در جامدات و مایعات را برشمرد. امواج به دو دسته کلی طولی و عرضی تقسیم می‌شوند. امواج صوتی طولی هستند یعنی محیط در راستای حرکت موج جابه‌جا می‌شود. امواج روی یک ریسمان عرضی هستند، محیط در جهتی عمود بر حرکت موج جابه‌جا می‌شود. در تمام موارد هرچند اغتشاش حامل انرژی در محیط پیش می‌رود، ولی اتم‌های دخیل در این حرکت در حوالی موقعیت تعادلی خود باقی می‌مانند. پس در انتشار یک موج، اغتشاش جابه‌جا می‌شود نه محیط حامل آن و این یکی از ویژگی‌های اساسی موج است که آن را از یک جویبار ذره‌ای متمایز می‌سازد. بادی که بر روی مزرعه می‌وزد، ساقه‌های گندم را به حرکت در می‌آورد ولی هر ساقه تنها در محل خود تکان می‌خورد. گفته شده نقاش معروف لئوناردو داوینچی[1] اولین کسی بود که فهمید موج محیط را جابه‌جا نمی‌کند، و این همان ویژگی هست که امکان می‌دهد موج با سرعتی بسیار زیاد حرکت کند[۱۹].

[1] L.Da vinci

۲-۱-۱-معادله دیفرانسیل موج

در سال ۱۷۴۷ ژان‌لورن دالامبر[1] یک معادله دیفرانسیل پاره‌ای در بررسی‌های ریاضی فیزیک وارد کرد. او در این سال مقاله‌ای در مورد حرکت ارتعاشی ریسمان‌ها نوشت و معادله دیفرانسیل موج برای اولین بار در آن مقاله ظاهر شد. این معادله دیفرانسیل، پاره‌ای خطی همگن مرتبه دوم و توصیف کننده امواج فیزیکی در محیط (بدون جذب) به حساب می‌آید که برای امواج یک بعدی به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}=\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} \qquad (۱-۲)$$

انواع مختلف موج با تابع موج ψ بیان می‌شوند. بعضی از این توابع موج، بر حسب فشار یا جابه‌جای نوشته می‌شوند، بعضی دیگر به میدان‌های الکترومغناطیسی مربوط می‌شوند ولی تمام این توابع موج جواب‌هایی از معادله دیفرانسیل موج (۲-۱) می‌باشند. این معادله موج پاره‌ای است زیرا موج باید تابعی از چند متغیر مستقل، یعنی متغیرهای فضایی و متغیر زمان باشد. معادله دیفرانسیل خطی معادله‌ای است که در آن هر جمله، حاصلضرب یک مقدار ثابت در ψ یا مشتق‌های آن باشد. نکته مهم این است که تنها توان اول چنین جملاتی می‌تواند وجود داشته باشد، همچنین هیچ حاصلضربی از ψ و مشتق‌های آن نباید وجود داشته باشد[۲۰].

۲-۱-۲-اصل برهم‌نهی امواج

معادله دیفرانسیل موج (۲-۱) یک خاصیت جالب موج را نشان می‌دهد، خاصیتی که برای رفتار ذرات کلاسیک نامحتمل است. اگر فرض کنیم که توابع موج ψ_1 و ψ_2 هر کدام جواب معادله موج باشند، در این صورت $(\psi_1+\psi_2)$ نیز یک جواب معادله موج می‌باشد. این را اصل برهم‌نهی امواج می‌نامند. معنی فیزیکی این اصل این است که اگر دو موج مجزا به یک نقطه فضا برسند و روی هم بیفتند، با هم جمع می‌شوند و یا از هم کم می‌شوند بدون اینکه اصل هر یک از موج‌ها تغییر کند. پس در نتیجه اغتشاش برآیند در هر نقطه ناحیه همپوشانی دو موج، جمع جبری اغتشاش‌های تک تک موج‌ها در آن ناحیه می‌باشد. بنابراین وقتی دو موج از ناحیه همپوشانی عبور می‌کنند هیچ تاثیری از موج دیگر نپذیرفته‌اند[۲۰].

[1] J.Dalembert

۲-۲-ماهیت نور

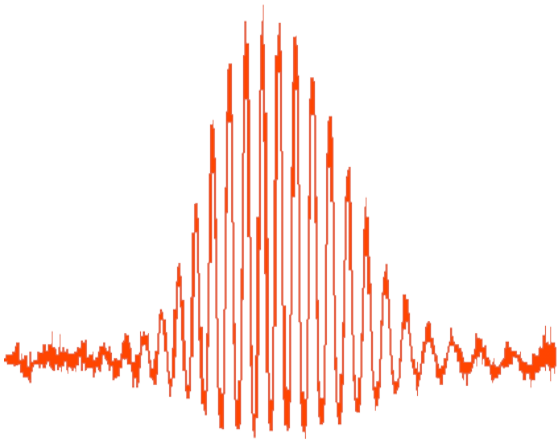
تحول درک ما از ماهیت فیزیکی نور یکی از جذاب ترین فصل‌های تاریخ علم را تشکیل می‌دهد. از سپیده دم علوم جدید در قرن شانزدهم و هفدهم میلادی، نور به صورت ذره یا به صورت موج تصور می‌شده است و هر یک از این الگوها در دوره‌ای مورد توجه جامعه علمی بوده است. در قرن بیستم معلوم شد که نور هم خاصیت موجی و هم خاصیت ذره‌ای دارد، در حالی که دقیقا هیچ یک از این دوخاصیت نیست. این وضعیت گیج کننده، که دوگانگی موج – ذره نامیده شد. مدتها بزرگترین مغزهای علمی معاصر را به کار انداخت تا چاره‌ای برای این الگوهای به ظاهر متناقض پیدا کنند. حل این معما با ابداع الکترودینامیک کوانتومی به دست آمد که یکی از موفقترین ساختارهای نظری در تاریخ فیزیک است[۲۷].

۲-۲-۱-تابش الکترومغناطیسی

منشاء تمام انرژی‌های تابشی حرکت غیر یکنواخت بار می‌باشد. وقتی با امواج در میدان‌های الکترومغناطیسی سروکار داریم به دلیل اینکه بار منشاء این میدان‌ها است، بنابراین تعجبی ندارد که منشاء تابش الکترومغناطیسی نیز بار باشد. بار ساکن میدان الکتریکی $(\vec{E})$ ثابت تولید می‌کند و میدان مغناطیسی $(\vec{B})$ به وجود نمی‌آورد، بنابراین تابش صورت نمی‌گیرد. بار دارای حرکت یکنواخت هم میدان $\vec{E}$ به وجود می‌آورد و هم میدان $\vec{B}$ ولی باز تابش صورت نمی‌گیرد. اگر همراه بار حرکت کنیم بار متحرک یا جریانی مشاهده نمی‌شود، بنابراین میدان $\vec{B}$ نیز ناپدید می‌شود. ولی بار با حرکت غیریکنواخت میدان الکتریکی و مغناطیسی وابسته به زمان تولید می‌کند که باعث تابش الکترومغناطیسی می‌شود[۲۱].

۲-۲-۲- تپ الکترومغناطیسی

در اصطلاح فیزیکی به مجموعه‌ای از امواج الکترومغناطیسی که در فرکانس‌های نزدیک به هم نوسان می‌کنند و در یک جهت پیش می‌روند تپ الکترومغناطیسی (شکل۲-۱) گفته می‌شود. هر یک از امواج تشکیل دهنده تپ با سرعتی به نام سرعت فاز و پوش امواج که در اصطلاح همان تپ نامیده می‌شود با سرعت گروه که در ادامه به توضیح آن پرداخته شده است، حرکت می‌کند.



شکل ۲-۱: تپ الکترومغناطیسی

یکی از مهمترین تپ‌های الکترومغناطیسی تپ الکترمغناطیسی لیزر است. مزیت یک تپ الکترومغناطیسی لیزر در این است که با استفاده از یک انرژی کم می‌توان به توان بسیار بالایی دست یافت. چون پهنای زمانی تپ لیزر کوتاه است فشردگی انرژی در یک زمان کوتاه رسیدن به یک شدت بالا را فراهم می‌سازد[۲۲].

۲-۲-۳- طیف الکترومغناطیسی

تابش الکترومغناطیسی می‌تواند بر حسب طول موج یا بسامد تغییر کند. رده‌بندی از روی تغییرات طول موج را به صورت اختصار طیف الکترومغناطیسی می‌نامند. در سال ۱۸۶۷ هنگامی که ماکسول اولین بررسی وسیع نظریه الکترومغناطیسی خود را منتشر کرد، پهنای فرکانسی شناخته شده از فروسرخ ، مرئی و فرابنفش[1] تشکیل می‌شد. ولی این تنها بخش کوچکی از طیف وسیع الکترومغناطیس بوده است.

طیف الکترومغناطیسی به علت تفاوت در روش تولید یا آشکارسازی آنها با اسامی خاصی مانند امواج رادیویی (از چند هرتز تا حدود $۱۰^{۹}$ هرتز)، امواج میکروویو[2](از حدود $۱۰^{۹}$ تا $۱۰^{۱۱} \times ۳$ هرتز)، امواج فروسرخ[3](از حدود $۱۰^{۱۱} \times ۳$ تا $۱۰^{۱۴} \times ۴$ هرتز)، نور (از حدود $۱۰^{۱۴} \times ۴$ تا $۱۰^{۱۴} \times ۸$ هرتز)، فرابنفش (از $۱۰^{۱۴} \times ۸$ تا $۱۰^{۱۶} \times ۳/۴$ هرتز)، پرتوهای x (از $۱۰^{۱۶} \times ۳/۴$ تا $۱۰^{۱۹} \times ۵$ هرتز) و پرتوهای گاما (از حدود $۱۰^{۱۹} \times ۵$ تا $۱۰^{۲۴}$ هرتز) نامیده شده‌اند. پرتوهای گاما پر انرژی ترین تابش الکترومغناطیس هستند و کوتاه‌ترین طول موج را دارند[۲۱].

[1] Ultraviolet
[2] Microwave
[3] Infrared

۲-۳-سرعت فاز

سرعت فاز یک موج، نرخ انتقال فاز آن موج در فضا است. این سرعت در هر فاز برای فرکانس‌های مختلف یک موج قابل تعریف است. برای هر فرکانس خاص می‌توان سرعت فاز یک فاز مشخص (مثلا قله موج) را محاسبه کرد. سرعت فاز بر حسب دوره تناوب موج و طول موج به صورت زیر به دست می آید:

$$v_{ph} = \frac{\lambda}{T} \qquad (۲-۲)$$

۲-۳-۱-سرعت گروه

مفهوم سرعت گروه برای اولین بار در سال ۱۸۳۹ توسط هامیلتون[1] مطرح شد ولی در آن زمان توجه زیادی به آن نشد تا اینکه مدتی بعد استوکس[2] در سال ۱۸۷۶ آن را در قالب هیدرودینامیک مطرح کرد. استوکس از مفهوم تپ برای توصیف سرعت گروه استفاده کرد، بدین صورت که آهنگ پیشروی لبه جلوی یک تپ را سرعت گروه نامید. در حقیقت وقتی چند موج با فرکانس‌های مختلف با هم جمع می‌شوند تا یک اغتشاش مرکب (تپ) را ایجاد کنند، پوش مدولاسیون حاصل با سرعتی متفاوت از سرعت موج‌های (سرعت فاز) تشکیل دهنده آن حرکت می‌کند که آن را سرعت گروه می‌نامند. البته این موضوع برای محیط‌های پاشنده[3] که به توضیح آن پرداخته خواهد شد، صحت دارد. به این دلیل که سرعت گروه میانگینی از سرعت فاز موج‌های تشکیل دهنده تپ است، لیکن برای محیط‌های غیر پاشنده سرعت گروه برابر سرعت فاز موج‌های تشکیل دهنده تپ خواهد بود[۱۲].

۲-۳-۲-پاشندگی

پاشش یا پاشندگی یا تفرق نور پدیده‌ای است که در آن سرعت فاز یک موج به بسامد آن وابسته‌است و یا به طور معادل سرعت گروه (V_g) آن موج تابعیت بسامدی به شکل زیر داشته باشد:

$$\omega = \omega(k)$$
$$V_g = (\frac{d\omega}{dk}) \qquad (۲-۳)$$

[1] Hamilton
[2] Stokes
[3] Dispersion